

МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа
**«Исследование характеристик фотодиодов и
фототранзисторов»**

Москва, 2006 г.

Краткие теоретические сведения

Фотодиод. Принцип действия фотодиода основан на фотогальваническом эффекте, который возникает в полупроводниках при воздействии на него внешнего излучения. Например, при освещении *p-n* перехода монохроматическим светом с энергией фотонов $E_{\phi} > \Delta E_z$ имеет место собственное поглощение квантов света и генерируются неравновесные фотоэлектроны и фотодырки. Под действием электрического поля перехода эти фотоносители перемещаются: электроны - в *n*-область, а дырки - в *p*-область, т.е. через переход течет дрейфовый ток неравновесных носителей. Если цепь разомкнута концентрация электронов в *n*-области и дырок в *p*-области увеличивается, поле объемного заряда атомов примеси в переходе частично компенсируется и потенциальный барьер снижается. Это снижение происходит на величину фотоЭДС, называемую напряжением холостого хода фотодиода U_{XX} . Значение U_{XX} не может превышать контактную разность потенциалов перехода, поскольку при этом полностью компенсируется электрическое поле и разделение фотоносителей в переходе прекращается. Если *p*- и *n*-области соединить внешним проводником, то $U_{XX} = 0$ и в проводнике потечет ток короткого замыкания $I_{KЗ}$, образованный неравновесными фотоносителями. Если к *p*- и *n*- областям освещенного перехода подключить сопротивление нагрузки $R_H \neq 0$, по нему потечет ток нагрузки $I_H < I_{KЗ}$ и падение напряжения на нем будет $U_H < U_{XX}$. В нагрузке будет выделяться электрическая мощность $P_H = I_H \cdot U_H$. Такой режим работы называется фотогальваническим и используется в элементах солнечных батарей. Если в цепь фотодиода и R_H последовательно включен источник питания, обеспечивающий обратное смещение *p-n* перехода, то такой режим работы фотодиода называют фотодиодным.

Семейство вольтамперных характеристик фотодиода $I = f(\Phi)$ при $\Phi = const$ показано на рисунке 1.

Световыми характеристиками диода в фотогальваническом режиме являются зависимости тока короткого замыкания от светового потока $I_{KЗ} = f(\Phi)$ и напряжения холостого хода от светового потока $U_{ХХ} = f(\Phi)$, показанные на рисунке 2. Нелинейность $I_{KЗ} = f(\Phi)$ при увеличении Φ объясняется ростом падения напряжения на объемном сопротивлении базы фотодиода, а нелинейность $U_{ХХ} = f(\Phi)$ - уменьшением потенциального барьера при росте Φ . Точка пересечения ВАХ фотодиода и нагрузочного резистора определяет электрическую мощность $P_H = I_H \cdot U_H$, выделяемую в нагрузку.

Параметром семейства ВАХ является световой поток Φ . При $\Phi_0 = 0$ ВАХ фотодиода не отличается от ВАХ обычного полупроводникового диода. При $\Phi > 0$ на ВАХ фотодиода можно выделить две области, соответствующие разным режимам работы фотодиода:

III квадрант - фотодиодный режим;

IV квадрант - фотогальванический режим.

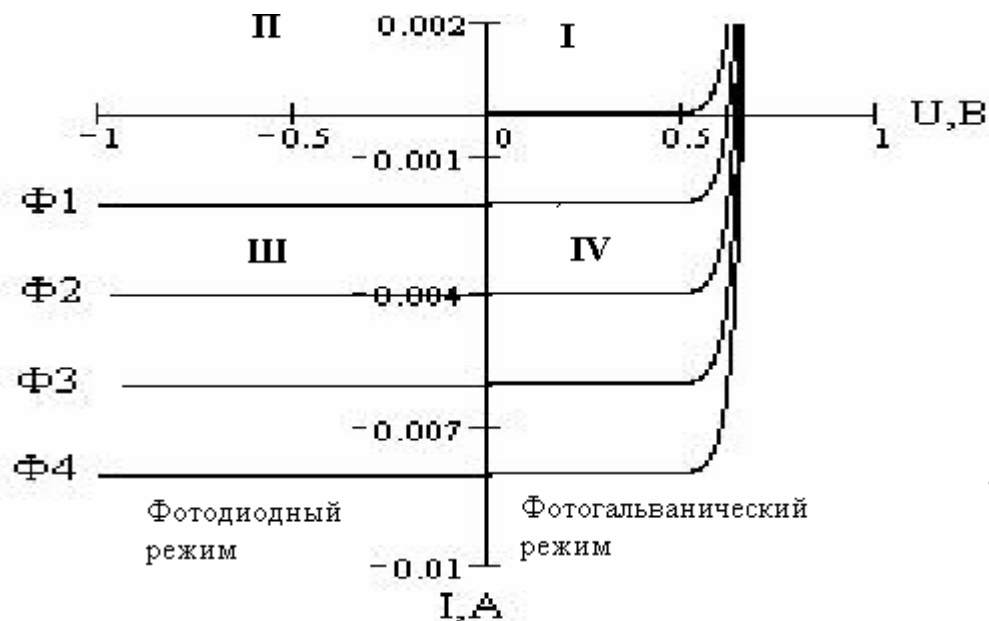


Рисунок 1. Семейство вольтамперных характеристик освещенного фотодиода.

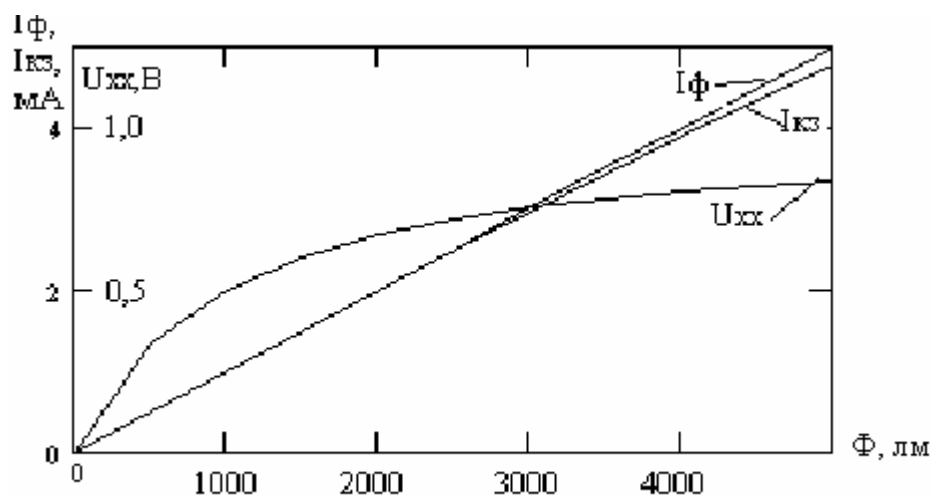


Рисунок 2. Зависимости тока короткого замыкания I_{kz} , напряжения холостого хода U_{xx} и фототока I_{ϕ} от мощности светового потока Φ .

В фотодиодном режиме фототок прямо пропорционален падающему световому потоку, и световая (энергетическая) характеристика $I_{\phi} = f(\Phi)$ практически линейна (рисунок 2). Инерционность фотодиода определяется, прежде всего, скоростью процесса разделения носителей в $p-n$ -переходе и скоростью перезаряда барьерной емкости. Наименее инерционны фотодиоды с точечным переходом или с барьером Шотки.

Фототранзистор – это транзистор, в котором инжекция неравновесных носителей осуществляется на основе внутреннего фотоэффекта. Фототранзистор служит для преобразования световых сигналов в электрические с одновременным усилением фототока. Фототранзистор представляет собой монокристаллическую полупроводниковую пластину, в которой при помощи особых технологических приёмов созданы 3 области, называемые, как и в обычном транзисторе, эмиттером, коллектором и базой, причём последняя, в отличие от БП транзистора, как правило, вывода не имеет. Кристалл монтируется в защитный корпус с прозрачным входным окном. Включение фототранзистора во внешнюю электрическую цепь подобно включению биполярного транзистора, выполненному по схеме с общим эмиттером и нулевым током базы. При попадании света на коллекторно-

базовый переход в нем образуются парные носители зарядов (электроны и дырки), которые разделяются электрическим полем коллекторного перехода. В результате в базовой области накапливаются основные носители, что приводит к снижению потенциального барьера эмиттерного перехода и увеличению (примерно в β - раз) тока через фототранзистор по сравнению с током, обусловленным переносом только тех носителей, которые образовались непосредственно под действием света.

Семейство вольтамперных характеристик фототранзистора $I_k=f(U_{кэ})$ при $\Phi=\text{const}$ показана на рисунке 3.

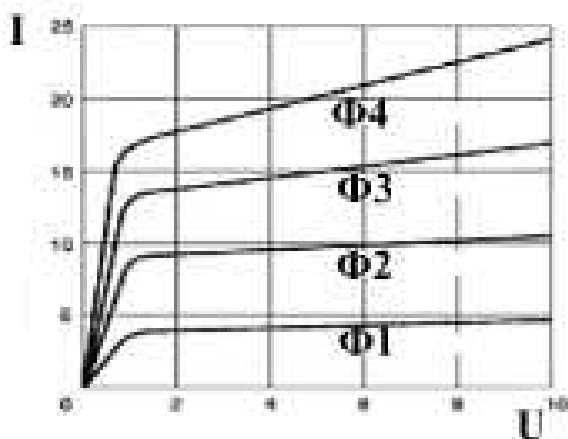


Рисунок 3. Семейство вольт-амперных характеристик фототранзистора.

Семейство вольтамперных характеристик фототранзистора не отличается от ВАХ биполярного транзистора, но входным параметром является не ток базы, а световой поток.

Основными параметрами и характеристиками фототранзисторов, как и других фотоэлектрических приборов (например, фотоэлемента, фотодиода), являются:

- **интегральная чувствительность** (отношение фототока к падающему световому потоку), у лучших образцов фототранзистора (например, изготовленных по диффузионной планарной технологии) она достигает 10 А/лм;

- **спектральная характеристика** (зависимость чувствительности к монохроматическому излучению от длины волны этого излучения), позволяющая, в частности, установить красную (длинноволновую) границу применимости фототранзистора, эта граница (зависящая, прежде всего, от ширины запрещенной зоны полупроводникового материала) для германиевого фототранзистора составляет 1,7 мкм, для кремниевого - 1,1 мкм;

- **постоянная времени** (характеризующая инерционность фототранзистора) не превышает нескольких сотен мкс. Кроме того, фототранзистор характеризуется коэффициентом усиления первоначального фототока, достигающим 10^2 - 10^3 .

Высокие надёжность, чувствительность и временная стабильность параметров фототранзистора, а также его малые габариты и относительная простота конструкции позволяют широко использовать фототранзистор в системах контроля и автоматики - в качестве датчиков освещённости, элементов гальванической развязки и т.д.

Описание лабораторной установки

Основой лабораторной установки является серийный прибор *CHARACTERISCOPE-Z* (тип TP-4805), позволяющий снимать семейство вольтамперных характеристик (ВАХ) при различных величинах светового потока.

На основе этих характеристик можно определить следующие параметры фотодиода:

- световую (энергетическую) характеристику в фотодиодном режиме;

- токовую чувствительность в фотодиодном режиме; зависимость тока короткого замыкания от светового потока в фотогальваническом режиме; зависимость напряжения холостого хода от светового потока в фотогальваническом режиме; оптимальное сопротивление нагрузки в

фотогальваническом режиме; максимальную мощность, отдаваемую в нагрузку в фотогальваническом режиме.

Конструктивно фотодиод выполнен вместе со светоизлучателем в одном непрозрачном корпусе. В качестве светоизлучателя используется светодиод. К внешним электрическим цепям фотодиод и светоизлучатель подключаются тремя проводниками (один является выводом светодиода, второй – фотодиода, третий - общий).

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Для исследования фотодиода необходимо собрать электрическую схему, показанную на рисунке 4.

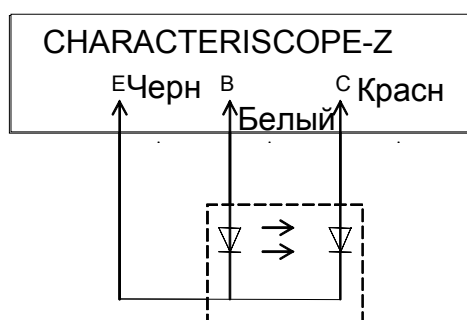


Рисунок 4. Схема подключения фотодиода и светодиода к характеристическому прибору.

1. На приборе *CHARACTERISCOPE* установите ручки управления в следующие положения:

- тумблер **"OFF"** в нейтральное положение;
- переключатель **"HOR. VOLTS"** в положение 0,1 В;
- переключатель **"VERT. CURRENT"** в положение (50 –100) мкА;
- переключатель **"BASE STEPS"** в положение "6";
- тумблер **"STEP POL"** в положение "+";
- кнопка **"ONE CURVE"** отжата;
- переключатель **"STEP AMPLITUDE"** в положение (5-10) мА.

2. Включите питание прибора ручкой **"SCALE ILLUM"** и установите удобный уровень освещенности шкалы. Время прогрева прибора не менее 5 минут.

3. После прогрева прибора (появление луча на экране) ручками **"VERT.POS"** и **"HOR.POS"** установите удобное положение начала координат ВАХ на экране прибора.

4. Тумблером **"OFF"** подключите фотодиод и светоизлучатель к прибору.

5. Переключателями **"VERT. CURRENT"** и **"STEP AMPLITUDE"** установите удобный масштаб ВАХ по вертикали, соответствующий максимальному использованию экрана характерокопа. Ручкой **"OFFSET"** отрегулируйте положение начала координат для кривой семейства, соответствующей нулевому световому потоку $\Phi = 0$ (до момента остановки).

6. Для регистрации прямых ветвей семейства ВАХ фотодиода переключатель **"COLLECTOR SUPPLY"** установите в положение **"-AC"**, для регистрации обратных ветвей семейства - в положение **"+AC"**.

Значения тока через светоизлучатель I_0 будут задаваться с шагом, соответствующим положению переключателя **"STEP AMPLITUDE"**.

Световой поток светоизлучателя определяется по формуле:

$$\Phi = \kappa I_0,$$

где $\kappa = 100 \text{ лм/мА}$; I_0 – ток через светоизлучатель (светодиод).

7. Снимите семейство ВАХ фотодиода при $\Phi = \text{const}$, сопрягая прямые и обратные ветви семейства, соответствующие одинаковым значениям светового потока Φ (см. рисунок 1.).

На семействе ВАХ фотодиодному режиму работы фотодиода соответствует область "обратное напряжение - обратный ток" (III квадрант).

8. Для фотодиодного режима выберите значения напряжения $U_{\text{ОБР1}}$ и графически постройте световую характеристику фотодиода $I_{\Phi} = f(\Phi)$

при $U_{OBR} = U_{OBR1}$ (см. рисунок 2), где I_{ϕ} - фототок через фотодиод, совпадающий по направлению с I_{OBR} (см. рисунок 1).

9. Для выбранной рабочей точки на световой характеристике рассчитайте токовую чувствительность фотодиода $S = \Delta I_{\phi} / \Delta \Phi$, (мкА/лм).

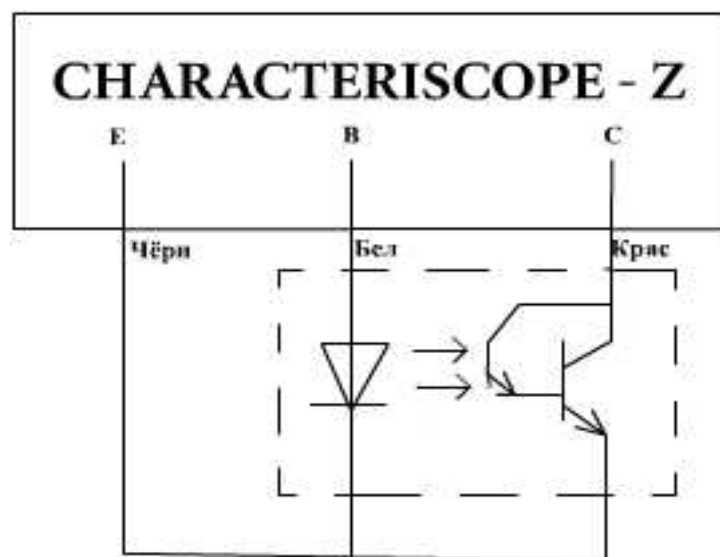
На семействе ВАХ фотогальваническому режиму работы фотодиода соответствует область "прямое напряжение - обратный ток" (IV квадрант).

10. Для фотогальванического режима по ВАХ графически измерьте значения тока короткого замыкания в напряжения холостого хода фотодиода для различных значений светового потока и постройте графики $I_{K3} = f(\Phi)$ и $U_{XX} = f(\Phi)$ (см. рисунок 2).

11. Для кривой семейства ВАХ, соответствующей максимальному световому потоку, рассчитайте положение оптимальной рабочей точки фотодиода. Критерием оптимальности является максимальная мощность, отдаваемая фотодиодом в нагрузку в фотогальваническом режиме. Для этого, перемещая положение точки A по ВАХ, соответствующей максимальной освещенности фотодиода (на рисунке 1 это соответствует $\Phi = \Phi A$) и рассчитывая в каждой точке значения мощности $P = U_{OBR} * I_{OBR}$, найдите максимальную мощность P_{max} , отдаваемую фотодиодом в нагрузку.

12. Для оптимальной рабочей точки рассчитайте оптимальное сопротивление нагрузки $R_{H OPT}$. Рассчитайте по ВАХ сопротивление базы ($R_{BH} = U_{XX} / I_{K3}$) и сравните его с $R_{H OPT}$.

Для исследования фототранзистора необходимо собрать электрическую схему, показанную на рисунке 5.



Фототранзистор выполнен в одном непрозрачном корпусе со светозлучателем

Рисунок 5. Схема подключения фототранзистора и светодиода к характеристоскопу.

13. На CHARACTERISCOPE установите:

- тумблер **“OFF”** в нейтральное положение;
- переключатель **“HOR. VOLTS”** в положение 0.5 В;
- переключатель **“VERT CURRENT”** в положение (1-5) мА;
- переключатель **“COLLECTOR SUPPLY”** в положение “+AC”;
- переключатель **“BASE STEPS”** в положение “6”;
- переключатель **“STEP POL”** в положение “+”;
- переключатель **“STEP AMPLITUDE”** в положение 50 мкА-0.5 мА;
- кнопка **“ONE CURVE”** отжата.

Включите питание прибора ручкой (**“SCALE ILLUM”**), прогрейте его не менее 5 минут. Тумблером **“OFF”** подключите фототранзистор.

14. Получите семейство ВАХ фототранзистора, как показано на рисунке 3. Переключателями **“VERT CURRENT”** и **“STEP AMPLITUDE”** установите удобный масштаб ВАХ по вертикали, соответствующий чувствительности исследуемого фототранзистора. Ручкой **“OFFSET”** совместите

нижнюю кривую семейства ВАХ с горизонтальной осью. Значения тока через светоизлучатель I_c будут задаваться с шагом, соответствующим положению “STEP AMPLITUDE”. Рассчитайте световой поток фотоизлучателя:

$$\Phi = \kappa \cdot I_{cв} \quad \kappa=10 \text{ лм/мА.}$$

15. Постройте семейство ВАХ фототранзистора как зависимость $I_k=f(U_{кэ})$ при $\Phi=\text{const}$.

16. По семейству ВАХ постройте световую характеристику фототранзистора $I_k=f(\Phi)$ при $U_{кэ}=U_{кэ1}$.

17. На линейном участке световой характеристики выберите рабочую точку А и для нее рассчитайте токовую чувствительность фототранзистора

$S=\Delta I/\Delta \Phi \left[\frac{\text{мА}}{\text{лм}} \right]$ и сравните ее с токовой чувствительностью фотодиода.